レーザスペckル法に画像処理を援用した金属材料の損傷の検出* (第3報, 鋼材の疲労損傷の評価)

加 藤 章^{*1}, 川 村 満 夫^{*2}

Damage Monitoring of Metal Materials by Laser Speckle Assisted by Image Processing Techniques (3rd Report, Fatigue Monitoring of Steel)

Akira KATO and Mitsuo KAWAMURA

In this paper, we present a method for monitoring fatigue damage of steel specimens with no contact using the laser speckle method. This method is based on the phenomenon whereby the intensity distribution of the laser speckle changes depending on surface profile change invoked by fatigue damage. Analysis of the laser speckle distribution can be made quantitatively using an image processing system. Distribution of the speckle intensity was observed under cyclic tensile load with a constant stress amplitude. Surface roughness and surface profile were also investigated during the experiment. Intensity distribution of the laser speckle was found to be related to frequency distribution of the surface profile. This is the same as in the case of the static tensile test reported in the previous paper. The results showed that distribution of the laser speckle changes with the number of loading cycles. It was found that there is a possibility of estimating fatigue damage by observing the distribution of laser speckle intensity.

Key Words: Nondestructive Inspection, Optical Measurement, Fatigue, Carbon Steel, Laser Speckle, Image Processing, Surface Profile, Fourier Transform

1. まえがき

著者らは前報において塑性変形を与えた鋼材試験片についてレーザスペckルの強度分布の変化の様子を調べた⁽¹⁾⁽²⁾。静的な一軸引張りの荷重を加えて塑性変形を与えた場合についてスペckルの強度分布と表面性状を観測してみた。その結果、レーザスペckルの強度分布は塑性ひずみが大きくなるにつれて広がり、その間には一意的な関係があることがわかった。そして、スペckルの強度分布は断面曲線の周波数分布に明確に対応しており、表面あらさは必ずしも対応しないことが明らかになった。塑性変形が大きくなるほどすべり線の密度が高くなることによって断面曲線の高周波成分の割合が多くなり、スペckルの強度分布が広がって来るものと考えられる。

鋼材が繰返し荷重を受ける場合についても、静的な荷重によって塑性変形を与えた場合と同様に疲労損傷の進行につれてすべり線の発生が多くなり、すべり帯にそって次第に微視き裂が形成されるようになる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この際にはすべり線の密度が高くなることによって面の凹凸の

ピッチが細くなり、断面曲線の高周波成分の割合が多くなることが当然考えられる。したがって、このような試験片表面に対してレーザを照射すればスペckルの輝度分布が広がって来ることが予想される。この点については著者らがすでにアルミニウム合金を用いて行なった実験において、繰返し荷重によってスペckルの強度分布の変化があることを確認した⁽³⁾。本研究では前報と同じ材質の鋼材を用いて引張りの繰返し荷重を加えた場合についてスペckル強度の分布の変化を調べ、疲労損傷の評価へのレーザスペckル法の適用性を検討してみた。また、試験片表面の断面曲線の変化を同時に観測し、前報の一軸引張りによる塑性変形を加えた場合の結果と比較をして、表面性状とスペckルの強度分布の変化との対応関係を調べた。

2. 実験方法

使用した試験片素材は JIS-SS330 鋼材である。試験片は Fig. 1 に示すように、厚さ 3.2 mm、幅 15 mm の平板試験片で、中央に半径 20 mm の両側切欠きをつけてある。切欠き部の最小幅は 13 mm である。表面あらさの測定箇所およびレーザを照射する箇所は Fig. 1 に示すように、試験片の最小断面部中央である。試験片の初期の表面あらさ、特に表面状態の異方性はレーザスペckルの分布に大きく影響するので、試験片表面の最終仕上げ

* 平成 4 年 10 月 1 日 第 70 回全国大会講演会において講演、原稿受付 平成 4 年 11 月 19 日。

*¹ 正員、中部大学工学部(〒487 春日井市松本町 1200)。

*² 学生員、中部大学大学院。

は酸化アルミニウム粉末を用いてランダムな方向に磨くようにして、異方性をなくするとともに、どの試験片もほぼ同じ程度の表面あらさになるようにした。この試験片に対して油圧サーボ式の疲労試験機を用い、最小荷重0の片振りの引張り繰返し荷重を加えた。荷重繰返し速度は20 Hzである。適当な繰返し数毎に試験機を停止し、スペckルの観測と表面あらさの測定を行なった。表面あらさは触針式表面あらさ測定器を用いて試験片の軸方向及び垂直方向の二方向に測定した。また、あらさ測定器による断面曲線の出力結果をCCDカメラによって後に述べる画像処理システムに入力し、コンピュータを用いてフーリエ変換を行ない、断面曲線の周波数解析を行なった。

レーザスペckル観測用の光学系はFig. 2 (a)に示すとおりで、前報において使用したものと同じである⁽¹⁾⁽²⁾。試験片表面に He-Ne レーザ (出力5mW, ビーム径約1mm) を照射する。照射されるレーザ光の強さは偏光ビ

Fig. 1 Test specimen

(a) Optical system

(b) Image processing system

Fig. 2 Configuration of experimental system

ームスプリッターにより変化させることができるようになっている。試験片表面の反射光によるレーザスペckルパターンをスクリーンとして置かれたすりガラス上に形成する。ここで、試験片表面の座標系を $x-y$ 、スクリーン上の座標系を $u-v$ とする。スペckルパターンは CCD カメラを通して Fig. 2 (b) に示す画像処理システムに入力する。画像メモリの容量は 1024×512 で 1 ピクセルは 256 階調で表わされる。NEC の PC-9801 をホストコンピュータとし、画像処理ボード上の RISC 型の 32 ビット CPU, T-800 (トランスピュータ, Inmos Co.) を用いて画像処理プログラムを実行した。このようにコンピュータによる画像処理を用いることによってスペckルの強度分布を定量的に評価することができる。

ここで、CCD カメラの画像の明るさに対するダイナミックレンジはあまり広くないため、あまり輝度の高い点の明るさはカットオフされてしまい、検出できない。すなわち、画像メモリの輝度の最大値は 255 であり、これ以上の明るさをもつ点については真の明るさはわからない。したがって、255 以上の明るさの点があり多くならないように、光の強さを適当に弱くしなければならない。しかし、逆に光の強さを弱くし過ぎると、低い明るさの部分は検出できなくなり、検出の感度が悪くなる。すなわち、明るさが 255 以上の点があり多くならないように、かつあまり暗過ぎないように、CCD カメラのダイナミックレンジを十分に使えるように光の強さを調整しなければならない。本研究では、画像メモリの値で 250 以上の点が常に約 20 点程度になるように、偏光ビームスプリッターにより試験片に照射される光の強さを調整するようにした。

3. スペckル強度分布の評価法

スペckルの強度分布の一例を Fig. 3 (a) に示す。この図はスクリーン上の u 軸上 (Fig. 2 (a)) の輝度分布を表わす。この分布を平滑化するために、前報⁽²⁾と同様にスペckルの輝度分布の重心位置を中心として自己相関関数 $G(h)$ を求める。 $G(h)$ の分布を Fig. 3 (b) に示す。前報では $h=0$ に関する分散を求めてこの分布の広がりを表わすパラメータとして利用してきたが、この方法では重心位置から離れた箇所での光の強度のわずかな変動により、分散の値が大きく影響を受け、ばらつきを生じやすい。そこで、本研究では次のようなパラメータを考えた。

いま、自己相関関数 $G(h)$ の中心から左右半分の分布を表わす近似式として次式を考える。

$$G(h) = \exp(-a|h|) \quad (1)$$

この式は係数 a の値によって決まる。自己相関関数 $G(h)$ のデータから最小二乗法により係数 a の値を決定するわけであるが、ここでは中心付近の明るさの分布を問題にしているので、中心からかなり離れた箇所の低い輝度は無視して、 $G(h)$ が 0.1 以上のデータを用いて近似式を求めた。Fig. 3 (b) のデータから求めた近似式による計算値を Fig. 3 (c) に破線で示したが、 $G(h)$ の分布と良く合っていることがわかる。この分布の広がりを表わすパラメータとして、 $G(h)$ が 0.25 のときの h の幅 B を考える。近似式 (1) から B の値は次式により与えられる。

$$B = \frac{\ln(4)}{a} \approx \frac{1.3863}{a} \quad (2)$$

B の値は式 (1) の係数 a によって決まることになる。本研究では、この幅 B を用いてスペックルの強度分布の広がりを表わすことにする。

(a) Gray level distribution

(b) Autocorrelation function

(c) Approximation by an exponential function
Fig. 3 Width of speckle intensity distribution

4. 疲労による表面性状およびスペックル強度分布の変化

試験片素材の応力振幅と破断繰返し数との関係を表わす σ_a - N_f 曲線を Fig. 4 に示す。疲労限は約 115 MPa であるので、これ以上の応力振幅を用いて実験を行なった。Fig. 5 に応力振幅 $\sigma_a = 150$ MPa に固定して、順に繰返し数を増したときのスペックルの強度分布の変化の一例を示す。繰返し数が増すにつれてスペックルの強度分布が

Fig. 4 σ_a - N_f curve (a) $N = 0$ (b) $N = 0.2 \times 10^5$ (c) $N = 1.2 \times 10^5$

Fig. 5 Change of speckle intensity distribution by fatigue ($\sigma_a = 150$ MPa)

広がって来ることがわかる。各繰返し数に対するスペックルの強度分布の自己相関関数の分布の違いを Fig. 6 に示す。そして、スペックルの強度分布の広がりを出すパラメータ B_s (式(2)) と繰返し数 N の関係は Fig. 7 に示すとおりである。荷重繰返しの初期に B_s の値は増加し、その後しばらくは変化が少ない。そして、破壊の寸前に大きくなることがわかる。

Fig. 8 は試験片の表面状態の変化の様子を示す。応力繰返し数の増加につれてすべり線が深く、明瞭になり、その密度が増していることがわかる。Fig. 9 および Fig. 10 はそれぞれ断面曲線およびそれを FFT 解析したフーリエスペクトルの分布の変化を示したものである。フー

リエスペクトルの分布は繰返し数の増加につれて高周波側に広がっており、すべり線の密度の増加と対応している。フーリエスペクトルの自己相関関数 $R(\eta)$ を求め、応力繰返し数による分布の違いを比較したものが Fig. 11 である。スペックル強度の場合と同様に、 $R(\eta)$ の分布を式(1)と同じように η に関する指数関数で近似して、この分布の広がりを表わすパラメータ B_f (式(2)) を求め、応力繰返し数との関係を示せば Fig. 12 のようになる。

Fig. 6 Autocorrelation function of speckle intensity ($\sigma_a = 150$ MPa)

Fig. 7 Width of speckle distribution B_s versus stress cycles ($\sigma_a = 150$ MPa)

Fig. 8 Micrographs of specimen surface under cyclic loading ($\sigma_a = 150$ MPa)

Fig. 9 Surface profile change by fatigue ($\sigma_a = 150$ MPa)

Fig. 10 Fourier spectrum of the surface profile ($\sigma_a = 150$ MPa)

Fig. 11 Autocorrelation function of Fourier spectrum distribution ($\sigma_a = 150$ MPa)

Fig. 12 B_f versus N ($\sigma_a = 150$ MPa)

Fig. 13 Surface roughness Ra versus stress cycles ($\sigma_a = 150$ MPa)

断面曲線は測定箇所によってかなり違いがあるので、 B_f の値はばらつきが大きく、応力繰返し数との間の対応関係は B_s ほど明確ではないが、Fig. 7およびFig. 12より B_s と B_f の変化の傾向は似ていることがわかる。

Fig. 13に試験片表面の中心線平均あらさ Ra と応力繰返し数との関係を示した。応力繰返し数に対する Ra の変化はあまり大きくない。ただし、破断の直前においては Ra が急激に大きくなる。それ以前においては繰返し数に対する Ra の変化は明瞭ではないが、繰返し数に対して Ra がわずかに増加する傾向にあることは認められる。表面あらさは測定箇所によってばらつきがあるので、疲労の初期における表面あらさの小さな変化を明確に検出することは困難であると考えられる。

本研究では、応力振幅 $\sigma_a = 140, 150$ および 160 MPaの場合についてスペckル強度分布および断面曲線のフー

(a) Speckle intensity distribution

(b) Fourier spectrum distribution of surface profile

(c) B_s versus B_f

Fig. 14 Speckle intensity distribution and Fourier spectrum of surface profile under cyclic loading

リエスペckルの分布と繰返し数との関係を調べてみた。結果はFig. 14(a)および(b)に示すとおりである。ここでこれらのグラフの横軸は応力繰返し数をそれぞれの応力振幅に対する破断繰返し数 N_f で除して正規化している。各応力振幅に対する N_f の値はそれぞれ 2.68×10^5 , 1.63×10^5 , 0.859×10^5 である。応力振幅が大きいほどすべり線の密度も高く、微視的な塑性変形も大きいので、断面曲線の高周波成分の割合が大きくなり、全体に B_f の値も大きくなっている。そしてそれにつれてスペckルの強度の広がり B_s も大きくなっている。応力振幅が小さい場合には B_s の値が小さく、繰返し数に対する変化も小さい。 B_s の変化の様子に関しては、どの応力振

Fig. 15 Speckle intensity distribution and Fourier spectrum distribution (static tensile⁽²⁾)

幅の場合についても比較的良く似た傾向を示していることがわかる。荷重繰返し初期にすべり線の発生し始めに対応して B_s の変化が大きく、その後徐々に増加して行き、最終破断の直前にはき裂の発生に伴う塑性変形の増加によって B_s の値が大きく増加する。 B_s と B_f の関係は Fig. 14 (c) に示すとおりである。断面曲線は特に繰返し数が少ないときに測定箇所によってかなり違いがあるので、 B_f の値にはかなりばらつきがある。 B_s と B_f の間の関係には幅があるが、 B_f の増加につれて B_s の値も増加する傾向にあり、両者の間に対応関係があると考えられる。すなわち、スペckルの強度分布の広がりとは断面曲線の周波数分布の広がりとは対応していると言える。

Fig. 15 (a) および (b) は前報⁽²⁾で報告した静的な一軸引張りの場合の結果を用いて、 B_s と塑性ひずみ ϵ_p および B_s と B_f の関係を示したものである。Fig. 15 (b) には Fig. 14 (c) の繰返し荷重の場合の B_s と B_f の関係の範囲を破線で示してある。Fig. 14 (c) に示すように両者の関係にかなりばらつきがあるが、そのばらつきの範囲内で静的引張りの場合にも繰返し荷重の場合にも B_s と B_f の間にはほぼ同様な傾向があると考えられる。静的な一軸引張りによって塑性変形を加えた場合と繰返し荷重を加えた場合の断面曲線の周波数分布とスペckルの強度分布との間にはほぼ同様な傾向があるものと考えられる。

5. むすび

本研究では、鋼材試験片に一軸引張りの繰返し荷重を加えた場合の表面性状の変化およびレーザスペckル強度の変化について調べてみた。スペckルの強度分布およびフーリエスペckルの分布の自己相関関数を求め、これを指数関数近似して 1/4 幅をとるという方法によって分布を評価する方法をとった。この方法により分布の広がりを表わすパラメータとしてばらつきの少ないものが得られることがわかった。本研究で使用した延性の大きい鋼材では、荷重繰返し数の比較的初期にスペckル強度の分布は広がり、その後広がりの増加の割合が少なくなり、破断の寸前にふたたび急激に広がる傾向があることがわかった。応力振幅を三種類に変えて実験を行ってみた。応力振幅が大きいほど塑性ひずみが大きくなるのでレーザスペckルの広がりは大きく、繰返し数に対する広がりの増加も大きい。ほぼ良く似た傾向があることがわかった。また、断面曲線の周波数分布とスペckル強度の分布との間にも前報で報告した一軸の静的引張りの場合と同様に対応関係があり、実験値のばらつきの範囲内で両者の間には繰返し荷重の場合も静的な荷重の場合もほぼ同様な関係があることがわかった。

本実験により繰返し荷重による疲労損傷の進行につれてスペckル強度の分布は明らかに変化することがわかった。このことはこの方法によって疲労損傷を評価できる可能性があることを示していると言えよう。しかし、疲労損傷を評価するためのパラメータとして何を考えるか、また、疲労によるレーザスペckルの強度分布の変化の様子は応力振幅の大きさによって異なること、および材料の種類によって異なってくることが考えられるので、そのような場合に対して如何に適用するかなど今後の問題であろうと考える。

本研究は平成 3 年度文部省科学研究費補助金 (一般研究 (C), 課題番号: 03650090) および平成 4 年度永井科学技術財団研究助成の援助によるものであることを記して謝意を表する。

文 献

- (1) 加藤, 川村, 中谷, 塑性ひずみを与えた炭素鋼材のレーザスペckル強度と表面性状の関係, 機講論 No. 920-72, (1992), 19-20.
- (2) 加藤, 川村, 中谷, レーザスペckル法に画像処理を援用した金属材料の損傷の検出 (第 2 報, 表面性状とレーザスペckル輝度分布の関係), 機講論, No. 920-17 (A), (1992), 252-254.
- (3) Kato A, Dai Y. Z. and Chiang F.P., Damage monitoring of Metal Materials by Laser Speckle Assisted by Image Processing Techniques (Basic Experiment), *JSM E Int. J.*, 34-3, (1991), 374-380.
- (4) Mughrabi, H. et al., Fatigue Crack Initiation by Cyclic Slip Irreversibilities in High-Cycle Fatigue, *ASTM STP 811* (1983), 5.
- (5) Lin, T. H., Lin, S. R. and Wu X. Q., Micromechanics of an Extrusion in High-cycle Fatigue, *Proc. XVII International Congress on Applied Mechanics*, (1988).